
OTIMIZAÇÃO DE REDE DE IRRIGAÇÃO DE MICROASPERSÃO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS SOB DIFERENTES DECLIVIDADES E TARIFAÇÃO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA

Francisco F. N. Marcuzzo¹, Edson Wendland²

RESUMO

Os custos de instalação de redes de irrigação localizada tendem a ser elevados, o que inibe a sua utilização. No presente trabalho objetivou-se minimizar os custos de instalação e operação de redes de distribuição de água para irrigação localizada, frente a diferentes configurações de declividade do terreno e tarifação de energia elétrica e água. Para isso, foi desenvolvido um código em MatLab considerando-se todas as perdas de energia distribuídas e localizadas entre o início da rede e o conjunto motobomba para uma rede de irrigação padrão. As variáveis de decisão para otimização, com auxílio de algoritmos genéticos, foram os diâmetros de cada trecho da rede, pré-definidos por: dois diâmetros para linhas laterais, quatro para linhas de derivação, quatro para linhas secundárias e um para a linha principal. Os resultados mostram que o custo da rede varia entre 1816,42 e 2312,13 R\$ ha⁻¹ano⁻¹. O peso relativo do custo fixo e do custo variável da energia e da água no custo final do sistema de irrigação frente a diferentes condições foi analisado.

Palavras-chave: tarifa da água, tarifa de energia elétrica, irrigação localizada, algoritmos genéticos

ABSTRACT

MICRO-SPRINKLER IRRIGATION NETWORK OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS UNDER DIFFERENT LAND SLOP, AND WATER AND ENERGY COST

The high installation cost discourages use of low-pressure micro irrigation network. The following study was done to optimize its installation and operational costs considering the different configurations of land slop, and cost of electricity and water. An optimization code was developed in MatLab, considering the loss of total distributed and localized energy loss between the beginning of the network and the pumping device for a standard irrigation network. The decision making variables for optimization with the use of genetic algorithms consisted of the diameter of each stretch of network, predefined as: two options for drip lines, four for derivation lines, four for secondary lines and one for main line. The results show that the network cost varies between 1816.42 and 2312.13 R\$.ha⁻¹.year⁻¹. The relative weight of fixed and variable costs of energy and water in the final cost of the irrigation system for different conditions were analyzed.

Keywords: water price, energy price, low-pressure irrigation, genetic algorithms

Recebido para publicação em 13/10/2008. Aprovado em 24/11/2009

1 - Engenheiro Agrônomo, Pós-doutorando, Dr. em Hidráulica e Saneamento - EESC – USP, e-mail: fmarcuzzo@gmail.com

2 - Engenheiro Civil, Prof. Dr. do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, e-mail:ew@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

A irrigação por microaspersão é um conceito agrônomo de condução das culturas, que cria condições altamente controladas de fornecimento de água e de quimigação. O crescente interesse pela irrigação localizada nas últimas décadas deve-se, principalmente, à economia de água, energia elétrica e mão-de-obra. Em contrapartida, o que desestimula sua maior utilização por parte dos agricultores é o elevado custo de implantação da rede no que se refere às tubulações e equipamentos.

Santiago *et al.* (2004), em uma pesquisa de campo sobre parâmetros hidráulicos de microaspersão, discorrem sobre o bom funcionamento do sistema, com coeficientes de uniformidade elevados, eficiência de aplicação boa e pouca variação na vazão e pressão do sistema, indicando uma excelente qualidade de sistema de irrigação em funcionamento no campo.

Gomes (2004), em seu livro sobre sistemas de abastecimento de água, afirma que os custos de implantação e de operação de redes são antagônicos, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice-versa. Para o autor, ao se escolher um diâmetro menor para uma tubulação, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, mas em contrapartida, o custo da operação (energia para o bombeamento) será maior, sendo o inverso verdadeiro.

Tubulações fixas possibilitam o uso de combinações envolvendo diâmetros distintos e diferentes comprimentos nos diversos trechos da rede hidráulica destes sistemas de irrigação. A otimização das possíveis configurações hidráulicas, das redes de condutos de diferentes diâmetros, vem ao auxílio de uma minimização de diâmetros e, por conseguinte, de custos de instalação do sistema (SAAD *et al.*, 1994).

Saad & Marcuzzo (2006), estudando a distribuição de carga hidráulica em linhas de derivação otimizadas por otimização matemática, identificaram a programação linear como excelente ferramenta para o dimensionamento de redes de distribuição para irrigação, quando a mesma está submetida a diferentes declividades do terreno e uniformidades de emissão a serem alcançadas.

Machado (2005), cita que entre os métodos de otimização disponíveis, o algoritmo genético se destaca pela sua natureza robusta, que permite associar as características de eficácia e eficiência, e tem sido utilizado com frequência na otimização de sistemas

de abastecimento de água. Entre as suas principais vantagens, a autora destaca: não ter requisitos de linearização e cálculo de derivadas parciais; maior probabilidade de encontrar o ótimo global por realizar buscas simultâneas em várias regiões do espaço de soluções; facilidade de hibridização, flexibilidade e simplicidade na implementação.

Reca & Martínez (2006), trabalhando com otimização de redes de irrigação em malha com algoritmos genéticos (Ags), sugerem que mesmo obtendo resultados satisfatórios com o uso de Ags, alguns ajustes são aconselháveis para melhorar a performance dos algoritmos genéticos quando são grandes a complexidade das redes de distribuição de água para irrigação.

Segundo Iglesias & Blanco (2008), a introdução da tarifação da água reflete o verdadeiro custo da irrigação e é um dos mais inovadores componentes de seu dimensionamento. Alguns autores têm argüido que o comando e o controle da alocação de sistemas de irrigação baseados em cotas pode ser o melhor caminho para reduzir a demanda por água e, sendo assim, sinalizando limitações práticas para a tarifação volumétrica em países em desenvolvimento (Johansson *et al.*, 2002).

Zocoler (1998) estudou o efeito do diâmetro da tubulação nos custos dos sistemas de recalque de água com bombeamento utilizando motor a combustão e a eletricidade. Neste estudo foram consideradas as modalidades de tarifação da energia elétrica e os descontos especiais concedidos aos consumidores rurais com sistemas exclusivos para irrigação, a fim de obter a minimização do custo anual total através de um modelo matemático.

Pelo exposto acima, objetivou-se desenvolver um modelo computacional para simulação e otimização de projetos de rede de distribuição de água em sistemas de irrigação por microaspersão. Para a otimização, é adotada a técnica dos algoritmos genéticos visando à minimização de custos anuais fixos e operacionais obedecendo às restrições hidráulicas da rede. Por fim, executa-se uma análise de sensibilidade econômica do código desenvolvido, estudando o efeito de diferentes dados de entrada nos custos do dimensionamento otimizado da rede. São analisados os resultados no custo total da rede aumentando a declividade do terreno e com o acréscimo e decréscimo percentual nas tarifas de água e energia elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

A área modelo utilizada na modelagem e otimização do sistema de irrigação por microaspersão apresenta 1.600 m de comprimento por 492 m de largura, totalizando 78,72 ha. No entanto, considerando uma faixa mínima de mata ciliar de 57 m a partir das margens do rio e uma faixa de 7,5 m destinada à movimentação de máquinas e implementos, a área irrigável útil a ser utilizada para irrigação é de 68,40 ha. Na Figura 1 está apresentado o arranjo da área modelo, no qual será implantada a rede de irrigação localizada e na Figura 2 está apresentado o arranjo da distribuição da rede hidráulica na área.

A rede hidráulica do sistema de irrigação localizada estudada neste trabalho consiste de: emissores (microaspersores ou gotejadores), linhas laterais, linhas de derivação, linhas secundárias, linha principal, tubulação de sucção, válvulas, registros, filtros (de areia e disco) e painel de controle.

No Quadro 1 detalham-se os trechos das tubulações utilizadas neste trabalho, quanto ao comprimento, se está em nível ou em declive ou a cive (segundo a direção do fluxo de água), material utilizado na fabricação e número de diâmetros a serem usados no trecho.

Para o cálculo do fator de ajuste para diminuição da perda de pressão por atrito para tubulação, optou-se pela utilização da equação de ajuste proposta por Scaloppi (1988).

$$FLi = \frac{NTDi \times \left(\left(\frac{1}{m+1} \right) + \left(\frac{1}{2 \cdot NTDi} \right) + \left(\frac{(m-1)^{0.5}}{6 \cdot NTDi^2} \right) \right) + xLi - 1}{NTDi + xLi - 1} \quad (1)$$

em que

FLi = fator de ajuste para diminuição da perda de pressão por atrito para tubulação i ;

$NTDi$ = número total de derivações na tubulação i ;

m = expoente da vazão na equação de perda de carga unitária;

xLi = razão da distância do começo da linha i à primeira derivação, em relação à distância entre as outras derivações.

A equação geral proposta por Swamee (1993) é utilizada para o cálculo do coeficiente de atrito (f), em regime de escoamento laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso.

$$fin = \left\{ \left(\frac{64}{Rein} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7Din} + \frac{5,74}{Rein^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Rein} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2)$$

em que

fin = coeficiente de atrito para cálculo de perda de carga na tubulação na linha i no trecho n (adimensional);

$Rein$ = número de Reynolds na linha i no trecho n (adimensional);

ε = rugosidade absoluta da tubulação usada na linha i (mm);

Din = diâmetro da tubulação na linha i no trecho n (m).

A perda de carga unitária é determinada pela equação de Darcy-Weisbach (PORTO, 1999), também conhecida como fórmula universal da perda

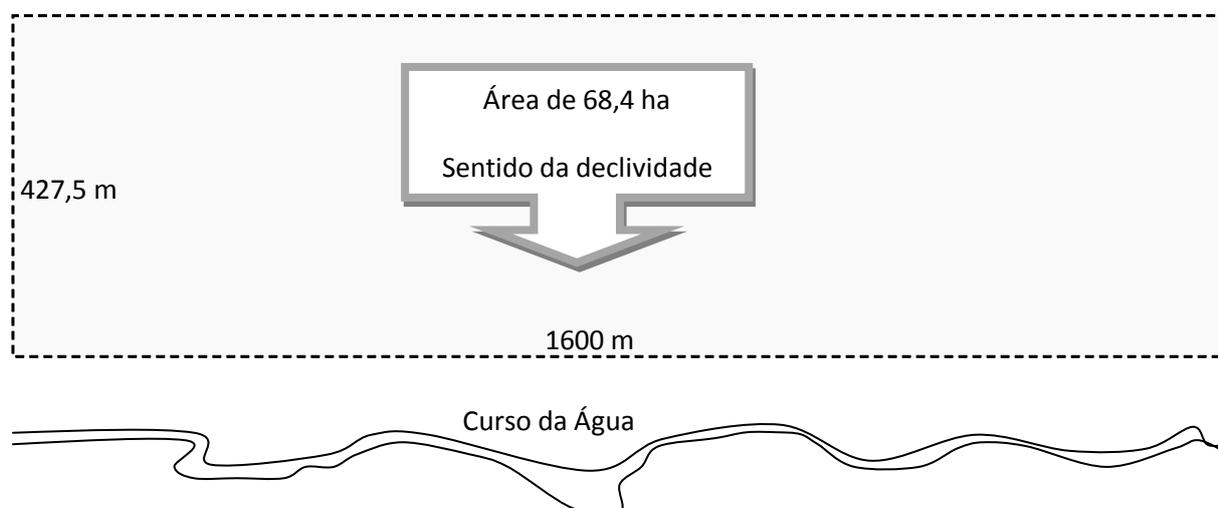


Figura 1. Arranjo da área modelo para implantação da rede hidráulica de irrigação

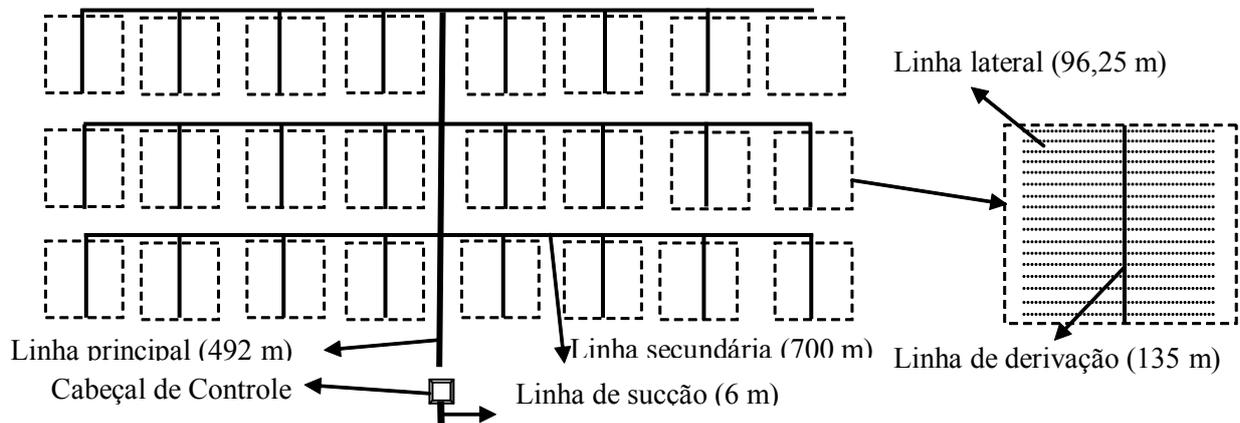


Figura 2. Esquema da rede de irrigação por microaspersão com as respectivas dimensões para cada tipo de tubulação

de carga.

$$J_{in} = \frac{f_{in} V_{in}^2}{D_{in} 2g} \quad (3)$$

em que

J_{in} = perda de carga unitária na linha i no trecho n ($m\ m^{-1}$);

D_{in} = diâmetro da tubulação na linha i no trecho n (m);

V_{in} = velocidade da água na linha i no trecho n ($m\ s^{-1}$);

f_{in} = coeficiente de atrito na linha i no trecho n (adimensional);

g = aceleração da gravidade ($m\ (s^2)^{-1}$).

O somatório da perda de carga unitária com a declividade distribuída do terreno é calculada por:

$$h_{fin} = (J_{in} \cdot FLi \cdot LLin) + PCLin + DZLLin \quad (4)$$

em que

h_{fin} = somatório da perda de carga e da declividade do terreno na linha i no trecho n (mca); J_{in} – perda de carga unitária na linha i no trecho n ($m\ m^{-1}$);

FLi = fator de ajuste para diminuição da perda de pressão por atrito para tubulação i ;

$LLin$ = comprimento da linha i no trecho n (m);

Quadro 1. Detalhamento dos trechos da rede hidráulica de irrigação

Trecho da Rede	Declividade	Material	Comprimento (m)	Número de Diâmetros Disponíveis
Linha Lateral	Nível	Polietileno	96,25	2
Linha de Derivação	Declive	PVC	135,00	4
Linha Secundária	Nível	PVC	700,00	4
Linha Principal	Aclive	PVC	492,00	1
Linha de Sucção	Aclive e Nível	PVC	6,00	1

$DZLLin$ = aclive ou declive distribuído por saída de água da linha i no trecho n (m).

O dimensionamento começa pela linha lateral, na qual são acoplados os emissores. Com base nas necessidades de água da planta a ser irrigada, determina-se a vazão que deve ter cada emissor. O somatório da vazão de todos os emissores indica a vazão que deve estar disponível no início da linha lateral. O dimensionamento é realizado trecho a trecho do começo da linha até o final, subtraindo a vazão em marcha do trecho anterior. Este princípio é adotado para as linhas laterais, de derivação e secundária. Para a linha principal (adutora) e para a linha de sucção, o dimensionamento não é executado trecho a trecho por não existirem derivações acopladas que recebam água simultaneamente.

Por se tratar de rede com vazão em marcha e o dimensionamento ser executado trecho a trecho, faz-se necessário um pré-dimensionamento das tubulações da rede.

As equações utilizadas no pré-dimensionamento da linha lateral foram:

$$EEE = \frac{Sp}{NPA} \quad (5)$$

em que

EEE = espaçamento entre emissores da linha lateral (m);
 Sp = espaçamento entre plantas (m);
 NPA = número de emissores por planta ajustado para um número inteiro.

$$E1E = \frac{EEE}{2} \quad (6)$$

em que

$E1E$ = espaçamento do primeiro emissor da linha lateral (m).

$$NTE = \left(\frac{LLL - E1E}{EEE} \right) + 1 \quad (7)$$

em que

NTE = número total de emissores na linha lateral;
 LLL = comprimento total da linha lateral (m).

$$NELL1 = \frac{LLL1}{EEE} \quad (8)$$

em que

$NELL1$ = número de emissores no primeiro trecho da linha lateral;
 $LLL1$ = comprimento do primeiro trecho da linha lateral (m).

$$NELL2 = NTE - NELL1 \quad (9)$$

em que

$NELL2$ = número de emissores no segundo trecho da linha lateral.

$$xLL = \frac{E1E}{EEE} \quad (10)$$

em que

xLL = razão da distância do começo da linha lateral ao primeiro emissor em relação à distância entre os outros emissores.

Para o pré-dimensionamento da linha de derivação foram utilizadas as equações:

$$EEL = Sf \quad (11)$$

em que

EEL = espaçamento entre as linhas laterais (m);
 Sf = espaçamento entre linhas de plantio (m).

$$E1L = \frac{EEL}{2} \quad (12)$$

em que

$E1L$ = espaçamento da primeira linha lateral até a tomada de água na linha secundária (m).

$$NTL = \left(\left(\frac{LLD - E1L}{EEL} \right) + 1 \right) \cdot 2 \quad (13)$$

em que

NTL = número total de linhas laterais acopladas na linha de derivação;
 LLD = comprimento total da linha de derivação (m).

$$NLLDn = \frac{LLDn}{EEL} \quad (14)$$

em que

$NLLDn$ = número de linhas laterais acopladas no trecho n da linha de derivação;
 $LLDn$ = comprimento do trecho n da linha de derivação (m).

$$xLD = \frac{E1L}{EEL} \quad (15)$$

em que

xLD = razão da distância do começo da linha de derivação à primeira saída, em relação à distância entre as outras linhas laterais.

As equações utilizadas no pré-dimensionamento da linha secundária foram:

$$EED = (LLL \cdot 2) + (EEUO) \quad (16)$$

em que

EED = espaçamento entre as linhas de derivação (m);
 LLL = comprimento total da linha lateral (m);
 $EEUO$ = espaçamento entre as unidades operacionais (m).

$$E1D = \frac{EED}{2} \quad (17)$$

em que

$E1D$ = espaçamento da primeira linha de derivação até a tomada de água na linha principal (m).

$$E_iD = E_{i-1}D + EED, \quad i = 2,3,4 \quad (18)$$

em que

E_iD = espaçamento da linha i de derivação até a tomada de água na linha principal (m).

$$NTD = \left(\left(\frac{LLS - E1D}{EED} \right) + 1 \right) \quad (19)$$

em que

NTD = número total de linhas de derivação acopladas em cada linha secundária;
 LLS = comprimento total da linha secundária (m).

$$xLS = \frac{E1D}{EED} \quad (20)$$

em que

xLS = razão da distância do começo da linha secundária à primeira saída em relação à equidistância entre as outras saídas.

A determinação do número de linhas de derivação acopladas na linha secundária ($NLDD1$, $NLDD2$, $NLDD3$ e $NLDD4$) é complexa devido à grande quantidade de condicionantes envolvidas para cada trecho da linha secundária e à quantidade de linhas de derivação que podem ser acopladas em cada trecho.

As equações utilizadas no pré-dimensionamento da linha principal foram:

$$EES = LLD + EEUO \quad (21)$$

em que

EES = espaçamento entre as linhas secundárias (m);
 LLD = comprimento total da linha de derivação (m).

$$E1P = EES \quad (22)$$

em que

$E1P$ = espaçamento da tomada de água até a primeira linha secundária (m).

$$\text{Se } (LLP > E1P) \therefore E2P = (2.EES); \text{ Se também } (LLP == E1P) \therefore E2P = 0; \text{ fim} \quad (23)$$

em que

$E2P$ = espaçamento da tomada de água até a segunda linha secundária (m);
 LLP = comprimento total da linha principal (m).

$$\text{Se } (LLP > E2P) \therefore E2P = (3.EES); \text{ Se também } (LLP == E2P) \therefore E3P = 0; \text{ fim} \quad (24)$$

em que

$E3P$ = espaçamento da tomada de água até a terceira linha secundária (m).

$$NTS = \left(\frac{LLP - LLA}{EES} \right) . 2 \quad (25)$$

em que

NTS = número total de linhas secundárias acopladas na linha principal;
 LLA = Distancia da saída da bomba ate o inicio da área a ser irrigada, dado em metros.

$$xLP = \frac{(E1P + LLA)}{EES} \quad (26)$$

em que

xLP = razão da distância do começo da linha principal à primeira saída em relação à equidistância entre as outras saídas.

A determinação das vazões nas tubulações

da rede seja inteira no começo da tubulação ou fracionada, para cada derivação (emissores ou tubulações acopladas) é de fundamental importância na concepção do código da função de aptidão.

Apresenta-se, a seguir, a metodologia da análise econômica implementada no código computacional.

No cálculo do custo total são considerados o custo fixo de instalação e os custos variáveis de operação. Utilizando-se os juros anuais, o fator de recuperação de capital (*FRC*) fornece um coeficiente que permite, a partir do valor do investimento, calcular o custo fixo anual referente a este investimento. Este cálculo leva em conta a vida útil do equipamento e a taxa de juros ao ano.

$$FRC = \frac{J(J+1)^V}{(J+1)^V - 1} \quad (27)$$

em que

FRC = fator de recuperação de capital (decimal);

J = taxa anual de juros (decimal);

V = vida útil dos equipamentos (anos).

O cálculo do custo fixo anual leva em conta o *FRC* e o preço de aquisição do sistema.

$$CF = FRC \cdot CEQ \quad (28)$$

em que

CF = custo fixo anual (R\$ ano⁻¹ ha⁻¹);

FRC = fator de recuperação de capital (decimal);

CEQ = preço de aquisição do sistema de irrigação (R\$.ha⁻¹).

No cálculo dos custos variáveis anuais da irrigação estão envolvidos os custos de energia e custo da água.

Para o motor elétrico, é importante considerar-se a modalidade de tarifação de energia elétrica. Segundo a resolução da ANEEL DOU n° 313 de 07/04/2006, este projeto de irrigação enquadra-se no Grupo B - categoria do setor Rural, sendo paga somente a tarifa de consumo de 0,1768 R\$ kW⁻¹. Estas tarifas ficam sem os tributos federais PIS/PASEP e COFINS, pois, já estão incluídos no custo.

Segundo a operadora de energia elétrica do Estado de São Paulo, entre os horários de 21 h 30 min. e 06 h 00 min. ("janela" de aproveitamento de 8,5 horas) há um desconto de 60% sobre a tarifa do setor rural,

o que resulta em uma tarifa de 0,0707 R\$ kW⁻¹ para esta faixa de horário. Por heurística, pode-se ajustar o sistema para funcionar 4,25 horas, trabalhando em dois turnos por dia, o que reduzirá a vazão de projeto, gerando economia em tubulação e potência requerida. Outra forma seria trabalhar com um turno de 8,5 horas, dependendo do objetivo que se pretende atingir. O ajuste pode ser feito aumentando a vazão dos emissores de acordo com a curva de vazão versus pressão fornecida pelo fabricante, ou simplesmente escolhendo outro emissor. Isto dependerá de quantos dias será o turno de rega e quantos setores com as unidades operacionais serão irrigados por dia, conforme o sistema a ser implantado.

O custo da água é calculado pela evapotranspiração da cultura, dias irrigados por mês, número de meses de operação do sistema por ano e o preço da água (R\$ (m³)⁻¹). Para tornar o modelo mais abrangente e real foi adotado o custo da água como parâmetro de entrada para o custo operacional. Adotou-se o preço de 0,01 R\$ (m³)⁻¹.

O custo total (função de aptidão a ser otimizada) é a soma dos custos fixos anuais (implantação do sistema de irrigação) e dos custos variáveis anuais (custos operacionais).

$$f = \frac{(CEQ \cdot FRC) + CTE + CAGT}{AUI} \quad (29)$$

em que

f = custo total com a rede de irrigação (R\$ ano⁻¹ ha⁻¹);

CTE = custo total com energia elétrica (R\$ ano⁻¹);

CATG = custo total com água (R\$ ano⁻¹);

AUI = área útil irrigada (ha).

O código para o dimensionamento otimizado foi desenvolvido na linguagem MatLab. Para a otimização foram utilizados os operadores genéticos da caixa de ferramentas do próprio MatLab.

Visando estudar a importância dos diferentes insumos no custo total do projeto de irrigação, optou-se por estudar variações hidráulicas e econômicas no dimensionamento das redes de irrigação. A análise de sensibilidade avaliou os efeitos nos custos e no dimensionamento hidráulico do sistema a partir da variação da declividade do terreno e da tarifa de água e energia elétrica. Fazer uma análise de sensibilidade é medir em que magnitude uma alteração prefixada em um ou mais fatores do projeto altera o resultado final, ou seja, faz-se o teste do modelo de projeção para determinar quais

Quadro 2. Tarifas de água e energia elétrica utilizadas na análise de sensibilidade

Insumo	Porcentagem da Tarifa de Base				
	50%	75%	100%	125%	150%
	----- R\$. $(m^3)^{-1}$ -----				
Água	0,0050	0,0075	0,0100	0,0125	0,0150
	----- R\$.kW ⁻¹ -----				
Energia Elétrica	0,0884	0,1326	0,1768	0,2210	0,2652
Energia Elétrica com 60% de Desconto	0,0530	0,0796	0,1061	0,1326	0,1591

são os elementos mais relevantes para a decisão de investimento analisada. Procedendo-se desse modo com os diversos parâmetros do projeto será possível selecionar aqueles mais sensíveis em termos de influência na análise (NORONHA & LATAPIA, 1988; FRIZZONE, 2005).

As variações na declividade do terreno estudadas foram de: 0, 2,5 e 5%. As variações nas tarifas de água e energia elétrica estudadas estão apresentadas no Quadro 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 2 apresentam-se os resultados obtidos com a variação da tarifa de água na otimização da rede de irrigação usando algoritmos genéticos. O custo final da água é dependente do volume de água aplicado por ano. O volume de água aplicado por ano é uma variável de entrada do programa, e por ser um número fixo que determina o volume de água a ser aplicado por irrigação, não atua diretamente como variável de otimização, apesar de ser parte integrante do custo final na função de aptidão (equação 29), juntamente com o custo de equipamentos e o custo de energia elétrica. A variação do custo da água afeta apenas o custo final do sistema, mas não interfere na otimização da rede de irrigação.

Verifica-se, no Quadro 2, que os comprimentos das duas tubulações com diferentes diâmetros para a linha lateral e os comprimentos das quatro tubulações com diferentes diâmetros para a linha secundária não sofreram alteração frente às diferentes declividades, por estarem posicionadas em nível na área (Figuras 1 e 2). Verifica-se, também, que ocorre variação nos comprimentos otimizados para a linha de derivação, já que está submetida às diferentes declividades. Para a linha de derivação há uma tendência, de que quanto maior a declividade menor é o comprimento do primeiro trecho, que possui maior diâmetro disponível, ocorrendo um ajuste para as tubulações intermediárias e final. Isto ocorre devido ao ganho de energia com a declividade do terreno.

No Quadro 3 estão apresentados os resultados obtidos com a variação da tarifa de energia elétrica. A variação na tarifa de energia elétrica é mais sensível ao dimensionamento otimizado por algoritmos genéticos. O custo de energia elétrica é parte integrante do custo final na função de aptidão (equação 29), e sua interferência nas variáveis de otimização é direta. Aumentando-se a tarifa de energia elétrica, aumenta-se o peso relativo da mesma na função de aptidão provocando alterações na busca pela rede economicamente ótima.

Observa-se na Tabela 2, que o programa de

Quadro 3. Variáveis otimizadas por algoritmos genéticos segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de água (50 a 150% da tarifa base de 0,01 R\$ $(m^3)^{-1}$)

Variáveis da Análise de Sensibilidade			Variáveis Otimizadas										
Dec ¹	Água	Energia Elétrica	L1 ²	L2 ³	D1 ⁴	D2 ⁵	D3 ⁶	D4 ⁷	S1 ⁸	S2 ⁹	S3 ¹⁰	S4 ¹¹	
%	R \$. (m ³) ⁻¹	R\$.kW ⁻¹	----- m -----										
0	0,005 a 0,015	0,1768	47,25	49,00	38	39	33	25	108	192	200	200	
2,5	0,005 a 0,015	0,1768	47,25	49,00	14	51	47	23	108	192	200	200	
5	0,005 a 0,015	0,1768	47,25	49,00	6	61	39	29	108	192	200	200	

¹ Declividade. ² Comprimento do primeiro trecho da linha lateral. ³ Comprimento do segundo trecho da linha lateral. ⁴ Comprimento do primeiro trecho da linha de derivação. ⁵ Comprimento do segundo trecho da linha de derivação. ⁶ Comprimento do terceiro trecho da linha de derivação. ⁷ Comprimento do quarto trecho da linha de derivação. ⁸ Comprimento do primeiro trecho da linha secundária. ⁹ Comprimento do segundo trecho da linha secundária. ¹⁰ Comprimento do terceiro trecho da linha secundária. ¹¹ Comprimento do quarto trecho da linha secundária.

Quadro 4. Variáveis otimizadas por algoritmos genéticos segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de energia elétrica (50, 75, 125 e 150% da tarifa base de 0,1768 R\$ kW⁻¹)

Dec ¹	Variáveis da Análise de Sensibilidade		Variáveis Otimizadas									
	Água	Energia Elétrica	L1 ²	L2 ³	D1 ⁴	D2 ⁵	D3 ⁶	D4 ⁷	S1 ⁸	S2 ⁹	S3 ¹⁰	S4 ¹¹
%	R\$. (m ³) ⁻¹	R\$. kW ⁻¹	----- m -----									
0	0,01	0,0884	47,25	49,00	31	44	39	21	111	189	200	200
2,5	0,01	0,0884	47,25	49,00	21	44	46	24	106	194	200	200
5	0,01	0,0884	47,25	49,00	6	59	62	8	109	191	200	200
0	0,01	0,1326	47,25	49,00	29	46	39	21	114	186	200	200
2,5	0,01	0,1326	47,25	49,00	18	47	41	29	111	189	200	200
5	0,01	0,1326	47,25	49,00	6	61	39	29	111	189	200	200
0	0,01	0,2210	47,25	49,00	31	44	39	21	110	190	200	200
2,5	0,01	0,2210	47,25	49,00	13	52	43	27	111	189	200	200
5	0,01	0,2210	47,25	49,00	6	59	49	21	104	196	200	200
0	0,01	0,2652	47,25	49,00	14	51	49	21	112	188	200	200
2,5	0,01	0,2652	47,25	49,00	15	50	43	27	115	185	200	200
5	0,01	0,2652	47,25	49,00	6	59	68	2	109	191	200	200

otimização busca o menor custo total diminuindo o comprimento das tubulações de menor diâmetro, quando se aumenta a tarifa de energia elétrica. Isso ocorre por que, quanto maior o comprimento da tubulação de menor diâmetro, maior será o gasto para bombeamento, devido ao maior atrito, afetando o custo total final.

Verifica-se ainda, na Tabela 2, que os comprimentos das duas tubulações com diferentes diâmetros para a linha lateral não sofreram interferência, ou seja, independente das variações nas tarifas de água (Tabela 1) e energia elétrica, sendo que os comprimentos ótimos para cada tubulação permanecem os mesmos. Os comprimentos das quatro tubulações com diferentes diâmetros para a linha secundária sofreram pequena alteração frente às diferentes declividades impostas para a linha principal e para a linha de derivação (Figura 2). Isto ocorre por que há uma interdependência entre os parâmetros de dimensionamento e de restrição hidráulica da linha principal e da linha de derivação quando há alteração da tarifa de energia elétrica, afetando diretamente o dimensionamento da linha secundária. Ressalta-se que houve modificação apenas nas duas primeiras tubulações da linha secundária, não havendo alteração nos dois últimos trechos.

Verifica-se, também, que ocorre grande variação nos comprimentos de tubulação para a linha de derivação, já que esta é diretamente influenciada pelas diferentes declividades. Para a linha de derivação há uma tendência de que, quanto maior a declividade, menor será o comprimento do primeiro trecho que possui maior diâmetro disponível, sendo

ajustadas as tubulações intermediárias e, final. Isto ocorre devido ao ganho de energia com a declividade do terreno, ou seja, o custo da energia elétrica para o bombeamento neste trecho diminui com o acréscimo da declividade.

Com a análise econômica das redes de irrigação, utilizando-se os resultados da função de aptidão, verifica-se o peso de cada componente do custo (equipamentos, energia elétrica e água) no custo total. Observa-se também a influência da variação da declividade e das tarifas de água e energia elétrica nos custos da rede de irrigação.

Na Tabela 3 estão apresentados os custos obtidos com a variação da declividade e da tarifa de água. Verifica-se, novamente, que a variação na tarifa de água influenciou apenas o custo da água na composição do custo total da rede.

Na Tabela 4, que apresenta o custo percentual de cada componente, verifica-se que o custo de água varia de 0,98% (declividade de 5% e tarifa de 0,005 R\$ m³) a 3% (declividade de 0% e tarifa de água de 0,015 R\$ m³).

Analisando o efeito da declividade na composição do custo final (Tabelas 3 e 4), detectam-se três tendências com o aumento da declividade do terreno: 1^a – o custo total anual da rede de irrigação aumenta; 2^a – o custo anual de equipamentos (custo fixo) diminui; 3^a – o custo com energia elétrica (custo variável) aumenta. O fato do custo anual com equipamentos diminuir deve-se ao aumento do custo com energia elétrica. Com o aumento da declividade há um ganho de carga de posição para a linha de derivação, levando a um menor comprimento para tubulações com maiores diâmetros (respeitando

Quadro 5. Custos da rede de irrigação segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de água (50 a 150% da tarifa base de 0,01 R\$ (m³)⁻¹)

Variáveis da Análise de Sensibilidade			Custos Anualizados por Hectare da Rede de Irrigação			
Declividade	Água	Energia Elétrica	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
%	R\$. (m ³) ⁻¹	R\$. kW ⁻¹	----- R\$. ha ⁻¹ . ano ⁻¹ -----			
0	0,005	0,1768	1611,20	344,57	20,14	1975,91
2,5	0,005	0,1768	1576,48	396,64	20,14	1993,26
5	0,005	0,1768	1573,55	467,55	20,14	2061,24
0	0,0075	0,1768	1611,20	344,57	30,21	1985,98
2,5	0,0075	0,1768	1576,48	396,64	30,21	2003,33
5	0,0075	0,1768	1573,55	467,55	30,21	2071,31
0	0,01	0,1768	1611,20	344,57	40,28	1996,05
2,5	0,01	0,1768	1576,48	396,64	40,28	2013,40
5	0,01	0,1768	1573,55	467,55	40,28	2081,38
0	0,0125	0,1768	1611,20	344,57	50,35	2006,12
2,5	0,0125	0,1768	1576,48	396,64	50,35	2023,47
5	0,0125	0,1768	1573,55	467,55	50,35	2091,45
0	0,015	0,1768	1611,20	344,57	60,42	2016,19
2,5	0,015	0,1768	1576,48	396,64	60,42	2033,54
5	0,015	0,1768	1573,55	467,55	60,42	2101,52

as restrições hidráulicas).

Os resultados obtidos apresentam concordância com os obtidos por Saad e Mariño (2002) que, estudando dimensionamento otimizado de irrigação localizada sob diferentes declividades, concluíram que o custo anual do sistema de irrigação aumenta com a inclinação da área.

Na Tabela 5 apresentam-se os custos obtidos com a

variação da declividade e da tarifa de energia elétrica. Ressalta-se que neste estudo o funcionamento da motobomba dá-se no intervalo das 21 h 30 min. às 06 h 00 min., em que há um desconto de 60% da tarifa normal para o setor rural. A variação na tarifa de energia elétrica influenciou os custos anuais de equipamentos, da própria energia elétrica e o custo total.

Quadro 6. Resultados percentuais dos custos segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de água (50 a 150% da tarifa base de 0,01 R\$ (m³)⁻¹)

Variáveis da Análise de Sensibilidade			Porcentagem dos Custos Anualizados por Hectare da Rede de Irrigação			
Declividade	Água	Energia Elétrica	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
%	R\$. (m ³) ⁻¹	R\$. kW ⁻¹	----- % -----			
0	0,005	0,1768	81,54	17,44	1,02	100
2,5	0,005	0,1768	79,09	19,90	1,01	100
5	0,005	0,1768	76,34	22,68	0,98	100
0	0,0075	0,1768	81,13	17,35	1,52	100
2,5	0,0075	0,1768	78,69	19,80	1,51	100
5	0,0075	0,1768	75,97	22,57	1,46	100
0	0,01	0,1768	80,72	17,26	2,02	100
2,5	0,01	0,1768	78,30	19,70	2,00	100
5	0,01	0,1768	75,60	22,46	1,94	100
0	0,0125	0,1768	80,31	17,18	2,51	100
2,5	0,0125	0,1768	77,91	19,60	2,49	100
5	0,0125	0,1768	75,24	22,36	2,41	100
0	0,015	0,1768	79,91	17,09	3,00	100
2,5	0,015	0,1768	77,52	19,51	2,97	100
5	0,015	0,1768	74,88	22,25	2,88	100

Quadro 7. Custos da rede de irrigação segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de energia elétrica (50 a 150% da tarifa base de 0,1768 R\$ kW⁻¹)

Variáveis da Análise de Sensibilidade			Custos Anualizados por Hectare da Rede de Irrigação			
Declividade	Água	Energia Elétrica	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
%	R\$ (m ³) ⁻¹	R\$ kW ⁻¹	----- R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----			
0	0,01	0,0884	1603,65	172,49	40,28	1816,42
2,5	0,01	0,0884	1585,92	200,80	40,28	1827,01
5	0,01	0,0884	1586,58	226,62	40,28	1853,48
0	0,01	0,1326	1601,75	258,72	40,28	1900,74
2,5	0,01	0,1326	1579,29	301,39	40,28	1920,95
5	0,01	0,1326	1574,47	350,38	40,28	1965,14
0	0,01	0,2210	1603,34	431,39	40,28	2075,01
2,5	0,01	0,2210	1573,44	500,44	40,28	2114,17
5	0,01	0,2210	1574,57	566,71	40,28	2181,56
0	0,01	0,2652	1571,37	521,84	40,28	2133,48
2,5	0,01	0,2652	1577,71	601,27	40,28	2219,26
5	0,01	0,2652	1591,43	680,42	40,28	2312,13

Avaliando a implicação da variação da declividade do terreno e da tarifa de energia elétrica no custo do sistema (Tabela 5), observa-se três tendências quando se aumenta a declividade do terreno e a tarifa de energia elétrica: 1^a – o custo total anual da rede de irrigação aumenta; 2^a – o custo anual de equipamentos (custo fixo) diminui; 3^a – o custo com energia elétrica (custo variável) aumenta. O custo pelo uso da água permanece constante, uma vez que o volume de água aplicado por ano (8274 L.planta⁻¹ ano⁻¹) e a tarifa (0,01 R\$ (m³)⁻¹) são fixos.

Na Tabela 6 estão apresentadas as percentagens dos custos com a variação da declividade e da tarifa

de energia elétrica.

Verifica-se que a menor percentagem do custo de energia elétrica foi de 9,50%, em relação ao custo total, para declividade de 0% e tarifa cheia de 0,0884 R\$ kW⁻¹ (com 60% de desconto reduz para 0,0530 R\$ kW⁻¹). Observa-se, ainda, que o maior custo percentual com energia elétrica foi de 29,43% em relação ao custo total anual, para declividade de 5% e tarifa cheia de 0,2210 R\$ kW⁻¹ (com 60% de desconto reduz para 0,1326 R\$ kW⁻¹).

A variação da declividade e da tarifação da energia elétrica produz também uma pequena variação no custo percentual da água (de 1,74 a 2,22% do custo

Quadro 8. Resultados percentuais dos custos segundo a variação da declividade (0 a 5%) e da tarifa de energia elétrica (50 a 150% da tarifa base de 0,1768 R\$ kW⁻¹)

Variáveis da Análise de Sensibilidade			Percentagem dos Custos Anualizados por Hectare da Rede de Irrigação			
Declividade	Água	Energia Elétrica	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
%	R\$. (m ³) ⁻¹	R\$. kW ⁻¹	----- % -----			
0	0,01	0,0884	88,29	9,50	2,22	100
2,5	0,01	0,0884	86,80	10,99	2,20	100
5	0,01	0,0884	85,60	12,23	2,17	100
0	0,01	0,1326	84,27	13,61	2,12	100
2,5	0,01	0,1326	82,21	15,69	2,10	100
5	0,01	0,1326	80,12	17,83	2,05	100
0	0,01	0,2210	77,27	20,79	1,94	100
2,5	0,01	0,2210	74,42	23,67	1,91	100
5	0,01	0,2210	72,18	25,98	1,85	100
0	0,01	0,2652	73,65	24,46	1,89	100
2,5	0,01	0,2652	71,09	27,09	1,82	100
5	0,01	0,2652	68,83	29,43	1,74	100

total), mesmo com a tarifação inalterada (Tabela 6). Verifica-se que, quanto menor a tarifa de energia elétrica maior será o peso percentual do custo final da água.

Conclui-se que a tarifa de energia elétrica, associada à declividade da área, possui grande influência nos custos finais de uma rede de irrigação. Para uma mesma tarifação de energia elétrica, verifica-se pelas Tabelas 3, 4, 5 e 6, que a declividade do terreno possui grande influência no custo total de uma rede de irrigação.

CONCLUSÕES

- A simulação computacional da cobrança da água no dimensionamento otimizado resultou em um peso médio de 2,0% do custo anual do sistema. Os custos com equipamentos e energia elétrica representaram, respectivamente, 78,3 e 19,7%. O custo com energia elétrica para o bombeamento da água faz parte do custo variável anual de uma rede de irrigação localizada, que continuará fomentando um maior esforço por parte do irrigante em busca de melhores tecnologias de manejo do sistema para economizar água.
- O menor custo da rede de irrigação, 1816,45 R\$ ha⁻¹ ano⁻¹, foi encontrado para 0% de declividade, 100% de tarifa de água (0,01 R\$ (m³)⁻¹) e 50% de tarifa de energia elétrica (0,1768 R\$ kW⁻¹). Já o maior custo da rede de irrigação, 2312,13 R\$ ha⁻¹ ano⁻¹, foi encontrado para 5% de declividade, 100% de tarifa de água e 150% de tarifa de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq - Brasil (processo 141159/2006-5) pelo auxílio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FRIZZONE, J.A. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Piracicaba: ESALQ, 2005. 371p.
- GOMES, H. P.; SILVA, J.G. Dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, considerando variáveis as condições de contorno do projeto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 2 abr/jun 2006, p. 99-110.
- IGLESIAS, E.; BLANCO, M. New directions in water resources management: The role of water pricing policies. **Water Resources Research**, 44, W06417, 2008.
- JOHANSSON, R.C.; J. TSUR, T.L. ROE, R. DOUKKALI; A.DINAR. Pricing irrigation water: A review of theory and practice, **Water Policy**, 4, p. 173-199.
- MACHADO, E.C.M.N.; SANTANA, C.W.S; BRASILEIRO, E.V.; GALVÃO, C.O.; BRASILEIRO, F.V. Otimização da operação de redes de adução de água utilizando algoritmos genéticos. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005. João Pessoa, SP: **Anais...** Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos.
- NORONHA, J.F.; LATAPIA, M.X.I.C. Custos de produção sob condições de risco no estado de São Paulo. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.26, n.3, p.275-287, 1988.
- PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 2ª ed. São Carlos: Editora da Universidade de São Paulo. 1999. 540p.
- SAAD, J.C.C.; TOMAZELA, C.; PERES, J.G.; FRIZZONE, J.A. Otimização da rede hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação linear. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 5, p. 797-805, maio 1994.
- SAAD, J.C.C.; MARCUZZO, F.F.N. Distribuição da carga hidráulica em linhas de derivação otimizadas por programação linear. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n.2, p. 406-414, mai/ago. 2006.
- SAAD, J.C.C.; MARIÑO, M. A. Optimum design of microirrigation systems in sloping lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 128, n. 2, p. 116-124, 2002.

SANTIAGO, F.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Avaliação de parâmetros hidráulicos e manejo da irrigação por microaspersão em área de assentamento. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p.632-643, set/dez. 2004.

SCALOPPI, E.J. Adjusted F factor for multiple-outlet pipes. **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, v. 114, n. 1, 1988, New York. p. 169-174.

SWAMEE, P.K. Design of a submarine pipeline. **Journal of Transportation Engineering**. New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, Jan. 1993.

ZOCOLER, J.L. **Modelo para dimensionamento econômico de sistemas de recalque em projetos hidroagrícolas**. Piracicaba: USP, 1998. 107p. (Tese de doutorado)